

# 美俄空间核动力技术发展态势评析

杭爽<sup>1</sup>, 杨洲<sup>1</sup>, 陈国玖<sup>1\*</sup>, 袁子程<sup>2</sup>

1. 军事科学院战略评估咨询中心, 北京 100091

2. 中国核动力研究设计院反应堆工程研究所, 成都 610213

**摘要** 新一代空间核动力及推进技术的突破, 将颠覆空间探测任务的样式。目前美国、俄罗斯加速了空间核动力系统的研发进程, 相关技术处于世界领先地位。梳理了空间核动力系统基本分类和典型应用场景, 综述了美俄空间核动力技术的发展历程及现状, 并分析了美俄空间核动力技术的发展态势。结果表明, 与冷战时期相比, 未来空间探测任务对核动力系统的功率、灵活性、可靠性和安全性等提出了新的要求; 美国、俄罗斯均高度重视空间核动力技术的发展, 但发展战略和技术路线均存在差异, 美国以下一代太空能力建设和深空探测项目为牵引, 全面开展同位素电池、空间反应堆、核热推进系统、核电推进系统的研发; 俄罗斯基于自身核电推进技术优势, 重点发展核电推进飞船项目, 意图以有限的资源投入保持自身太空领域竞争力。

**关键词** 空间核动力; 核推进; 空间反应堆

空间核动力技术指在外层空间利用核能为航天器提供热能、电能或推进力的技术, 由于核动力装置具有高能量密度、长寿命、大功率、强自主的特点, 该技术的应用, 将大幅提升航天器的机动能力、任务覆盖能力、有效载荷和任务时长, 是支撑未来深空探测任务的关键技术之一。布局和发展空间核动力技术对维护国家安全、提升战略能力具有深远的现实意义。

空间核动力装置基本分类如图 1 所示, 空间核动力装置根据用途不同, 可分为核热源、核电源及核推进装置, 分别为航天器提供热能、电能和推进

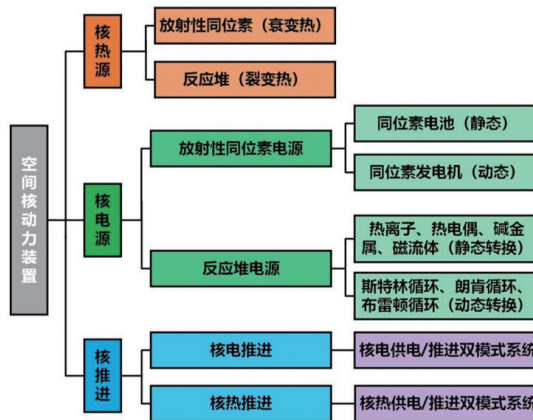


图 1 空间核动力装置基本分类

收稿日期: 2023-06-08; 修回日期: 2023-08-07

作者简介: 杭爽, 助理研究员, 研究方向为核技术与应用, 电子信箱: hangshuang1991@163.com; 陈国玖(通信作者), 研究员, 研究方向为太空战略, 电子信箱: bj\_cgj@163.com

引用格式: 杭爽, 杨洲, 陈国玖, 等. 美俄空间核动力技术发展态势评析[J]. 科技导报, 2023, 41(17): 84-90; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.17.010

力。在核热源与核电源中,根据核反应的不同,有放射性同位素源和核裂变反应堆两种类型<sup>[1-2]</sup>。根据换能方式的不同,放射性同位素电源可分为静态换能的同位素电池(RTG)和动态换能的同位素发电系统(DIPS)。放射性同位素源非常适合太阳光

辐射强度弱或极端空间热环境条件,在这些场景中,太阳电池阵+蓄电池组成的常规电源系统和热控系统难以适应,而放射性同位素源不仅能够正常工作,还具有更长的寿命,是深空探测器的首选。RTG与其他类型电源性能对比如表1<sup>[3]</sup>所示。

表1 不同类型空间电源性能比较

种类	比能/(Wh·kg <sup>-1</sup> )	比功/(W·kg <sup>-1</sup> )	寿命/月	功率/W	适应场景
燃料电池	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	1~3	10 <sup>3</sup> 量级	仅短期任务
太阳能电池-蓄电池系统	10 <sup>4</sup> ~10 <sup>5</sup>	10 <sup>2</sup>	12~60	10 <sup>3</sup> 量级	仅太阳光辐射强的场景
RTG	10 <sup>4</sup> ~10 <sup>5</sup>	2~5	120	10 <sup>2</sup> 量级	外空、月面、星际任务等

核裂变反应堆利用核燃料的裂变能为航天器或其他设施提供电能或推进动力。核裂变反应堆可满足未来太空任务中超大功率需求以及深远空间探索中的能源和动力供给,特别适用于太阳能利用困难、长周期无人深空探测任务以及星表探测任务。根据用途不同,空间裂变反应堆可用于空间核电源、核火箭发动机和星表核电站。其中空间核电源将反应堆的裂变热转换为电能,驱动大功率电推系统,以提供推进力,与此同时,反应堆还可以为其他设备提供电能,形成以空间核反应堆电源为基础的供电/电推双模式系统。核火箭发动机则是以核反应堆裂变热直接加热工质产生推进力,同时,核火箭发动机也可进行发电,形成以核热推进为基础的核热推进/供电双模式系统。大功率的核热/电推进技术特别适用于在大型深空探测任务中执行快速的星际飞行,可大大缩短飞行时间<sup>[4]</sup>。

空间核动力是事关国家安全的重要战略技术领域,美国和俄罗斯当前在该领域处于绝对领先地位,并拒绝任何形式的国际技术合作。通过回顾美俄空间核动力技术的研发和应用历程,梳理美俄在空间核动力领域的发展现状,分析其发展态势。

## 1 美国空间核动力发展态势

### 1.1 研发历程和现状

放射性同位素电源方面,美国研发最早、技术实力最强。美国用于航天任务的RTG均采用<sup>238</sup>Pu热源,最高输出功率可达300 W,最高热电转换效

率达6.7%,功率质量比达5.36 W/kg,设计寿命为15年左右。从1961年至今,美国在航天器上应用放射性同位素电源28次,主要用于卫星、月球站、火星着陆器及行星际探测器,目前尚有30多个放射性同位素电源在轨运行。这些同位素电源输出功率范围覆盖1.7 We到400 We,最长工作时间已超30年。最近一次应用是2020年7月30日发射的“毅力号”火星车,搭载了多任务RTG(MMRTG)<sup>[5]</sup>。当前,美国航空航天局(NASA)正在开发下一代RTG,即通用热源RTG(GPHS-RTG),Mod1型由16个<sup>238</sup>Pu通用热源耦合572个SiGe热电偶,输出电功率达245 We,热电效率达6%,比功率达4.4 W/kg,计划2030年左右交付可用于飞行的Mod1型GPHS-RTG。

在空间反应堆电源方面,美国从1954年起开展研究,历经核辅助电源系统(SNAP)计划、战略防御计划、国际TOPAZ计划、空间探测计划、普罗米修斯计划等不同时期,积累了大量的空间反应堆设计和实验经验<sup>[6]</sup>。美国曾于1965年4月3日开展一次空间反应堆电源系统飞行试验,利用“阿金纳”运载火箭将SNAP-10A型空间堆发射升空,12 h后反应堆达到满功率。在连续运行43 d后,由于运载火箭的电气故障,SNAP-10A被迫永久关闭。当前,美国正在实施的空间反应堆电源计划是星表裂变反应堆电源(FSP)计划和千瓦级电源计划(Kilopower)<sup>[7]</sup>。FSP计划由美国NASA和能源部(DOE)共同推动,技术方案采用UO<sub>2</sub>快堆+NaK冷却+斯特林发电方案,反应堆热功率达186 kW,电功率达48 kWe,系

统效率 21.5%，系统总质量 5820 kg，设计寿命为 8 年。该项目旨在助力“阿尔特弥斯”计划，为星表基地提供电力。根据 2011 年 NASA 发布的《空间电源发展路线图》，美国计划发展中小功率反应堆电源 (0.5~5 kWe) 替代 RTG 系统，实施这一目标的就是 Kilopower 项目。该项目采用铀钼合金燃料+钠热管冷却+斯特林发电的技术方案，设计电功率为 1~10 kWe，寿命为 10 年，4 座该型反应堆可满足火星前哨站的电力需求。2018 年 3 月，“采用斯特林技术的千瓦级反应堆”项目 (KRUST) 的 1 kW 演示机获得成功，成为 40 年来首个进行完全测试的空间核裂变反应器。美国能源部于 2020 年 11 月与空间核动力公司签署协议，授予该公司 Kilopower 技术使用权，拟采取公私合作方式推进这项技术的商业化。在超大功率空间堆方面，美国 NASA 马歇尔航天中心基于“高温气冷堆+磁流体发电”方案开展兆瓦级空间堆研究，反应堆热功率达 5 MW，输出电功率 2.76 MWe。美国核电推进与空间核电源研发同步启动，历经多个研究计划，到 2008 年，美国 NASA 提出“推动型技术发展论证”计划 (ETDD)，准备将核电推进技术应用于 300 kW 载人核电推进设计概念中<sup>[8]</sup>。

在核热推进方面，1955—1973 年，美国耗资 15 亿美元实施了名为 ROVER/NERVA 的核热推进计划，期间进行了 22 次发动机或整个推进系统的热试车，取得了丰富的数据<sup>[9-10]</sup>。通过这些实验，核燃料组件和发动机系统设计不断完善，达到了 5~6 级的技术成熟度，具备了开展飞行实验样机的研制基础，核热推进系统最长工作时间达 90 min，最高试验比冲为 845 s，功率达 4082 MW，推力达 930 kN。1982—1993 年“森林风”计划期间，美国政府耗资 8 亿美元，对以颗粒床反应堆为代表的核热推进反应堆开展了研究，该计划使美国对核热推进发动机的原理机制有了更深入的把握，技术得到进一步发展。为了缩短深空探测任务中星际飞行时间，美国持续推动核热推进系统研究。1989 年开始的太空探索倡议 (SEI) 计划确定了未来美国载人火星探测中使用以 NERVA 核火箭发动机为基础的核热推进系统；确定了满足载人火星任务所需的核热推进系统设计参

数，发动机总冲量需达到 334 kN，比冲 850 s，推进运行时间 120 min，反应堆热功率 1500 MW。2009 年发布的美国《载人火星探索设计参考体系 5.0》，基本确立了“重型运载火箭+核动力末级”的总体方案<sup>[11]</sup>。美国国家科学院于 2021 年 2 月 12 日发布题为《用于火星探索的太空核推进》的研究报告，进一步明确了实施载人火星探测任务中，空间核推进技术的必要性。在《2021 财年 NASA 拨款法》中，11 亿美元的太空技术资金中划出 1.1 亿美元用于核热推进技术开发，其中 8000 万美元用于“设计可进行飞行演示的试验系统”。2020 年 2 月，美国启动“敏捷地月行动示范火箭”项目 (DRACO)，该项目计划采用高含量低浓缩铀 (HALEU) 裂变反应堆加热氢气产生高推进力，实现空间快速飞行。目前，美国国防高级研究计划局 (DARPA) 已授予通用原子公司、蓝色起源公司和洛克希德·马丁公司第一阶段项目合同，目标是 2025 年在低地球轨道示范核热推进系统。2022 年初，美国米切尔航天研究所发表题为《太空机动战：核热推进的战略任务》的报告，呼吁基于核热推进技术研发具备高机动性的核动力卫星，提升美国太空作战能力<sup>[12]</sup>。与此同时，美国 DARPA 战术技术办公室呼吁增加核热推进技术研发预算。空间核动力技术不可避免地成为美国争夺制太空权依仗的重要技术力量。

## 1.2 国家战略

2019 年以来，美国政府频繁发布涉及空间核动力领域的政策文件，更新相关政策体系，统合重塑管理能力。一方面展现出美国保持空间技术优势和战略领导地位的强烈政治意图，另一方面也体现了空间核动力技术的重要战略地位。

美国政府于 2019 年 8 月 20 日发布总统备忘录《带有太空核系统的航天器的发射》(NSPM-20)，确立了“当太空核系统能够安全实现或增强太空探索或作战能力时，开发和使用该类型系统”的国家政策<sup>[13]</sup>。2020 年 12 月 11 日，发布《国家空间政策》总统备忘录，明确要求开发和利用空间核动力和推进系统以实现美国在科技、国防及商业领域的目标。2020 年 12 月 16 日，美国政府发布《有关空间核电源与核推进的国家战略备忘录》空间政策指令

SPD-6,对空间核动力系统研发目标、原则以及相关机构的职责分工以及研发路线图作出了规定<sup>[14]</sup>,将开发和使用空间核动力上升到国家战略层面。SPD-6总统备忘录明确了美国空间核动力的发展规划和主要时间节点。该备忘录显示,美国将在2020年代中期形成空间核反应堆核燃料生产能力;在2027年实现月球星表反应堆运行;在2020年代末完成核热推进关键技术突破,使核热推进系统能够满足美国国防部(DOD)和NASA的任务需求;在2030年开发出具有更高燃料效率、更长运行寿命和更高能量密度的放射性同位素电力系统。2021年1月6日,美国DOE发布《太空能源战略》,旨在进一步加强能源部推动下一代太空探索的能力。2021年1月12日,美国白宫发布《促进国防与太空探索小型模块化反应堆发展的行政指令》,要求美国DOD和NASA寻求发展供各自使用的小型核反应堆,并积极开展技术合作。

## 2 俄罗斯空间核动力发展态势

### 2.1 研发历程和现状

苏联基于 $^{210}\text{Po}$ 和 $^{238}\text{Pu}$ 热源,开发了多型放射性同位素电源,用于军事卫星和火星飞船,积累了丰富的研制经验。1965年,苏联首次给军事通信卫星“宇宙-84”和“宇宙-90”配备了基于 $^{210}\text{Po}$ 热源的放射性同位素电源。1969年和1971年分别给“月球车1号”和“月球车2号”配备了 $^{210}\text{Po}$ 热源作为保温设备。苏联还成功研制了基于 $^{238}\text{Pu}$ 热源的百毫瓦量级放射性同位素电源,但配备了该型电源的“火星-96”飞船于1996年和2011年2次发射失败<sup>[15]</sup>。

空间反应堆电源和核电推进方面,苏联基于温差发电和热离子发电2种方式,成功研发了ROMASHKA、BUK、TOPAZ-1、TOPAZ-2等4种主要型号的空间反应堆,反应堆热功率最高可达135 kW,电功率最高达7 kWe。历史上,苏联共发射了33颗装备BUK反应堆和2颗TOPAZ-1的“宇宙”号系列军事侦察卫星<sup>[16]</sup>。在电推进器方面,苏联自20世纪

60年代起研发了多种电推进器,其中最为成功的是SPT-50、SPT-60、SPT-70、SPT-100这4型使用氙气推进剂的霍尔推进器,比冲可达1500 s,推力达83 mN,功率达1.35 kW,运行时间为9000 h。这4型推进器已应用于60颗卫星,并长期在轨运行。此外,苏联还2次尝试使用TOPAZ-1空间反应堆电源驱动霍尔推进器,在轨运行时长超过2个月,证明了苏联核电推进技术的可靠性<sup>[2]</sup>。2009年12月,俄罗斯航天局宣布开发兆瓦级空间核动力飞行器运输动力模块(TEM)。该型核动力飞船计划采用反应堆供电+核电推进双模式,采用超高温气冷快堆+闭式布雷顿循环发电+热管/液滴辐射散热的技术方案。反应堆热功率达3.5 MW,电功率1 MWe,计划累计运行 $5\times 10^4$  h以上。2010年,俄罗斯启动核动力太空拖船(Nuklon)的研制工作,2018年开始制造测试用原型堆,并于同年10月,完成了核动力装置冷却系统的地面测试。2019年,俄罗斯国家航天集团公司完成了设计文档的开发和TEM模型的组件测试。2020年9月,俄罗斯军火库设计局开始组装核动力飞船,计划在2030年前将第一艘核动力太空拖船送入轨道并开展飞行试验<sup>[17]</sup>。2016年,俄罗斯公布了基于核能推进的火星探测计划,计划将地火飞行时间从18个月缩短至6周。

核热推进方面,苏联在1950—1980年的近30年时间里,开展了大量理论和实验研究,建设了大型核发动机试验基地“贝加尔”(Baikal)试验台架,研制了RD-401、402、404、405、0410、600等多台不同推力的核热火箭发动机<sup>[18-20]</sup>,探索了不同的结构方案,并开展了大量地面试验。其中最为成熟的是RD-0410实验样机,该样机热功率达196 MW,推力为35 kN,比冲达900 s。苏联解体后,俄罗斯继续开展了核热火箭的研究工作,确定了反应堆采用非均质设计、氢化锆慢化剂、三元碳化物燃料的核热火箭方案,其设计在性能和寿命上较同期美国方案具有一定的优势。从20世纪90年代末开始,俄罗斯参与国际科学技术中心用于载人航天的电源/推进综合体项目,设计了推力为68 kN、比冲大于900 s的双模式空间核动力系统。2007年起,俄罗

斯电力技术研究与设计院联合多部门,开始对 IVG-1 反应堆进行升级改造,并将开发电功率 100~500 kWe 的双模式核动力系统陆地原型装置作为核热推进技术的研发目标。

## 2.2 国家战略

近年来,俄罗斯以未来太空探索战略为牵引,持续增加空间核动力领域投入。俄罗斯政府于 2008 年 4 月批准了《2020 年前及以后俄罗斯联邦在空间活动领域政策的原则》,公布了俄罗斯政府将致力于全面开展空间研究、探索和利用。2010 年,时任俄罗斯总统的梅德韦杰夫签署《开发兆瓦级核动力飞船》的总统令,该核动力飞船研制计划总经费达 170 亿卢布,由俄罗斯国家原子能集团与国家航天局共同实施<sup>[21]</sup>。按照计划,俄罗斯兆瓦级核电推进飞船将在 2030 年实现首飞,并在一次任务中实现对月球、金星、木星的科学考察。该计划在国家战略规划层面,明确了俄罗斯加大投入,全面重启空间核动力技术研究的决心意志。

## 3 态势分析

美国、俄罗斯高度重视空间核动力技术的开发,从冷战期间就持续投入,积累了丰厚的技术实力,并在海洋目标监视雷达、深空探测等任务中得到了应用。美国、俄罗斯在空间核动力领域的技术积累如表 2 所示。在技术开发方面,虽各有侧重,但美国、俄罗斯对不同类型空间核动力系统的研究均全面布局。应用方面,美国对 RTG 的应用十分成熟,但存在  $^{238}\text{Pu}$  短缺、空间反应堆缺乏使用经验的问题;苏联更加侧重于空间反应堆的使用,积累了更为丰富的经验,但苏联解体后俄罗斯相关领域的研究已明显放缓。与冷战时期美俄技术积累相比,当前美国、俄罗斯对空间核动力技术应用方向主要是近地和深空轨道转移运输、载人航天任务、星表基地建设等方面,对相关核动力技术提出了超功率下高复用、中低功率下强灵活、辐射防护设计可靠、可靠运行时间更长等新需求。

表 2 空间核动力领域美国、俄罗斯技术积累对比

技术领域	美国	俄罗斯
同位素电源	31 次应用(54 个装置)	1 次应用(发射失败)
空间反应堆	7 型实验堆,1 次飞行实验	4 型反应堆,34 次应用
核热推进	20 座实验堆,大量地面试验	6 型发动机,大量地面试验
核电推进	无	1 次应用

通过分析美国、俄罗斯当前正在实施的空间核动力项目(表 3),发现美国、俄罗斯的战略目的、发展模式及技术路线均存在差异。

自 2018 年以来,以美国特朗普政府宣布组建太空军为标志,美国对未来太空力量布局和重组的步伐明显加快,对空间核动力技术研发重视程度也有所提升。美国以打造下一代太空能力和深空探测项目为牵引,通过国家顶层设计,空间核动力领域发展已全面铺开,研究和实践的脚步明显加速,并开始探讨空间核动力技术的军事应用潜力。在用途上,美国全面推进不同功率核动力系统开发,计划将 1~10 kWe 核电源系统用于科学探索、10~100 kWe 用于载人星体/小行星探索、1~5 MWe 用于载人火星探测任务。在发展路径上,美国继续开

发功率更高的下一代 RTG,为空间仪器仪表供电;推进 Kilopower 项目为代表的中小功率反应堆电源计划,替代放射性同位素电源,解决  $^{238}\text{Pu}$  燃料供应不足的问题;推动 Kilopower、FSP 项目,研发中、大功率星表反应堆电源,为载人登陆月球、火星,并建立星表基地做准备;在空间堆和电推进研发项目之外,着力推进 DRACO 项目,全面探索核电、核热 2 种空间推进方案。俄罗斯则在空间领域投入资金有限的情况下,意图以空间反应堆和电推进技术领域的丰富积累,打造深空探测领域的竞争优势,集中力量研发兆瓦级核电推进飞船,提升深空探测项目的效益,抵消中国、美国等国家在探月和深空探测领域较高的投入,保持俄罗斯在太空领域的竞争力。

表3 美国、俄罗斯正在实施的空间核动力项目

国家	类型/项目	实施单位	技术路线	主要性能参数	战略目标	当前/预期进展
美国	RTG: GPHS-RTG	NASA 和 DOE	GPHS+SiGe 热电偶	初始电功率 245 We, 达设计寿命时 电功率 177 We	开发高性能的 RTG, 为空间探索仪 器仪表提供电力 为登陆月球、火星	Mod1 型 计划 2030 年左右交付
美国	空间堆: Kilopower	NASA 和 DOE	UMo 合金热 堆+钠热管冷 却+斯特林发电	电功率 1~10 kWe	并建立基地提供电 力, 替代 RTG, 解 决 <sup>238</sup> Pu 供应问题	未来几年具备飞 行条件并实现商业 化应用
美国	空间堆: FSP	NASA 和 DOE	UO <sub>2</sub> 快堆 + NaK 冷却+斯特 林发电	热功率 186 kW, 电功率 48 kWe, 寿 命 8 年	助力“阿尔特弥 斯”计划, 为登陆月 球、火星并建立基地 提供电力	已经完成技术开 发, 具备实用条件
美国	核热推 进: DRACO	DARPA 和 NASA	HALEU 反应 堆加热氢气产 生推进力	—	用于推进可支持 深空探测任务的反 应堆概念设计	2025 年实现低地 球轨道核热推进系 统示范运行
俄罗斯	核电/推进 双模式系 统: Nuklon	国家原子能集团 和航天局	气冷快堆+布 雷顿发电 +Xe 离子推进器	热功率 3.5 MW, 电功率 1 MWe, 寿 命 ≥10 年	助力空间任务, 获 得优势, 对冲美中探 月和深空探测计划	2030 年进行首次 飞行

## 4 结论

空间核动力系统的研发考验国家的技术实力和工业能力, 相关经费投入大、研发周期长。但是大功率空间核动力及推进技术一经突破, 将推动空间探索领域的颠覆性变革, 也将深刻改变航天强国的实力对比。美国、俄罗斯经过 70 余年的持续投入, 在空间核动力应用领域积累了丰富的技术基础和使用经验。美国、俄罗斯在新的空间核动力发展规划指导下, 持续推进技术研发和应用。美国通过扩大空间核动力领域的投入, 以政商合作的方式同时探索多条技术路线, 以满足不同功率需求和应用场景, 全面支撑其太空能力建设和深空探测项目。俄罗斯在有限投入情况下, 采取重点突破的思路, 着力发展兆瓦级核电推进飞船, 以相关技术的突破带动航天事业的发展, 恢复其航天强国地位。当前, 美国、俄罗斯的一批中高功率核动力装置已完成或即将完成地面带核运行试验, 将在 2030 年前后开展空间试验, 空间核动力领域的发展将进入新的历史阶段。中国应以深空探测计划为牵引, 强化顶层设计和统筹协调, 加紧相关领域的布局发展。

## 参考文献 (References)

- [1] 马世俊, 唐玉华, 朱安文, 等. 空间核动力的进展[M]. 上海: 中国宇航出版社, 2019: 3-5.
- [2] 苏著亭, 杨继材, 柯国土. 空间核动力[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2020: 12-24.
- [3] 胡古, 赵守智. 空间核反应堆电源技术概览[J]. 深空探测学报, 2017(5): 430-443.
- [4] 杭观荣, 洪鑫, 康小录. 国外空间推进技术现状和发展趋势[J]. 火箭推进, 2013, 39(5): 7-15.
- [5] Cataldo R L, Bennett G L. U.S. space radioisotope power systems and applications: Past, present and future[M]. Cleveland: Glenn Research Center, 2012: 10-13.
- [6] Elliot J O, Reh K, MacPherson D. Lunar fission surface power system design and implementation concept[J]. AIP Conference Proceedings, 2006, 813(1): 942-952.
- [7] KiloPower project KRUSTY experiment nuclear design [R]. Los Alamos: Los Alamos National Lab, 2015.
- [8] Noca M, Polk J, Lenard R. Evolutionary strategy for the use of nuclear electric propulsion in planetary exploration [C]//The 18th Symposium on Nuclear Power and Propulsion. Albuquerque: NASA Technical Reports Server, 2001.
- [9] Robbins W. An historical perspective of the NERVA nuclear rocket engine technology program[C]//Conference on

- Advanced SEI Technologies. Cleveland Ohio: National Aeronautics and Space Administration, 1991: 1-14.
- [10] Nebergall K. Saturn Direct: What Mars colonists will dream and do[D]. United States Albuquerque: University of New Mexico, 2004.
- [11] Drake B G, Hoffman S J, Beaty D W. Human exploration of Mars design reference architecture 5.0[R]. Washington: NASA, 2009.
- [12] Christopher S. Maneuver warfare in space: The strategic mandate for nuclear propulsion[R]. Arlington: Mitchell Institute for Aerospace Studies, 2022.
- [13] Presidential memorandum on launch of spacecraft containing space nuclear systems[EB/OL]. (2019-08-20) [2023-07-07]. <https://trumpwhitehouse.archives.gov/presidential-actions/presidential-1-memorandum-launch-spacecraft-containing-space-nuclear-systems>.
- [14] Memorandum on the national strategy for space nuclear power and propulsion (space policy directive-6)[EB/OL]. (2020-12-16) [2023-07-07]. <https://trumpwhitehouse.archives.gov/presidential-actions/memorandum-national-strategy-space-nuclear-power-propulsion-space-policy-directive-6/>.
- [15] Koroteev A S. New stage in the use of atomic energy in space[J]. Atomic Energy, 2010, 108(3): 170-173.
- [16] Joseph R, Cassady R J, Frisbee R H. Recent advances in nuclear powered electric propulsion for space exploration[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(3): 412-435.
- [17] Vadim Z, Vladimir P. Russian nuclear rocket engine design for Mars exploration[J]. Tsinghua Science and Technology, 2007, 12(3): 256-260.
- [18] Siddiqi A A. Rocket engines from the glushko design bureau-1946-2000[J]. Journal of the British Interplanetary Society, 2001, 54(9): 311-334.
- [19] Benensky K. Summary of historical solid core nuclear thermal propulsion fuels[D]. State College: The Pennsylvania State University, 2013.
- [20] International Atomic Energy Agency. The role of nuclear power and nuclear propulsion in the peaceful exploration of space[M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005.
- [21] Zaki R, Pavhook V. Feasibility of the recent Russian nuclear electric propulsion concept[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(5): 1529-1537.

## Analysis on the development trend of space nuclear power technology in the United States and Russia

HANG Shuang<sup>1</sup>, YANG Zhou<sup>1</sup>, CHEN Guojiu<sup>1\*</sup>, YUAN Zicheng<sup>2</sup>

1. Strategic Assessments and Consultation Institute, Academy of Military Sciences, Beijing 100091, China

2. Reactor Engineering Sub-Institute, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China

**Abstract** Breakthroughs of next-generation space nuclear power and propulsion technology will completely change the style of future space exploration missions. At present, the United States and Russia have accelerated their research and development processes of space nuclear power systems to keep their leading positions. This article outlines the classification and application scenarios of space nuclear power systems, summarizes the technology development processes and strategies of the US and Russia. Furthermore, the development trend of space nuclear power is analyzed. The results indicate that compared to the Cold War era, future space exploration missions have put forward new requirements for the power, flexibility, reliability, and safety of the nuclear power systems. The US and Russia attach great importance to the development of space nuclear power technology but there are differences in development strategies and technological routes. The US is conducting comprehensive research and development on radioisotope thermo-electric generator, space reactors, nuclear thermal propulsion systems, and nuclear electric propulsion systems, all driven by next-generation space capability development and deep space exploration projects. Russia, on the other hand, focuses on developing nuclear power propulsion spacecraft projects, taking its own advantages in nuclear power propulsion technology, with the intention of maintaining its competitiveness in the space field with limited resource investment.

**Keywords** space nuclear power; nuclear propulsion; space nuclear reactor ●



(责任编辑 傅雪)